



WAGENINGEN **UR**
For quality of life

De OPAC 106 warmtewisselaar

H.F. de Zwart



Productschap  Tuinbouw



Ministerie van Economische Zaken,
Landbouw en Innovatie

Rapport GTB-1133



© 2011 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw.

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 48 60 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
2	Horizontale temperatuur-homogeniteit	9
	2.1 Meetopstelling	9
	2.2 Resultaten	11
	2.3 Conclusie	13
3	Evenwichtigheid van koelvermogen	15
	3.1 Resultaten	15
	3.2 Conclusie	17
4	De OPAC 106 voor verwarming met geothermie	19
	4.1 Inpassing van de warmtewisselaar	19
	4.2 Economische prestatie	26
	4.3 Conclusie	29
5	Overall conclusie	31

Samenvatting

De technische specificaties van de OPAC106 geven aan dat deze als een efficiënte warmtewisselaar geclassificeerd kan worden, vooral gegeven de compacte inbouwmaten. De prestaties van deze warmtewisselaar worden uitgebreid beschreven in een rapport wat als vooronderzoek voorafgaand aan het voorliggende project is uitgevoerd (de Zwart *et al.*, 2010)¹.

Ook is er op grond van een inventarisatie onder tuinders die al een aantal jaren gebruik maken van warmtewisselaars met soortgelijke materialen een verwachting uitgesproken over de technische levensduur die van de OPAC106 verwacht mag worden (de Zwart, 2011)². Deze inventarisatie geeft aan dat een levensduur van tien jaar reëel is, zolang de koelers worden gebruikt in een milde corrosieve omgeving. Overigens zullen de lamellen desondanks in de loop van de tijd brosser worden. Dit maakt dat het schoonmaken van de warmtewisselaars na verloop van tijd steeds voorzichtiger zal moeten plaatsvinden omdat de lamellen langzaam hun buigbaarheid zullen verliezen.

Vanuit tuinbouwkundig perspectief gaat het vooral om de vraag of het kasklimaat wat met deze warmtewisselaar kan worden gerealiseerd voldoet aan de eisen voor wat betreft het klimaat, zowel tijdens koelen als tijdens het verwarmen. Het gaat daarbij vooral om de horizontale homogeniteit op gewashoogte. Als die homogeniteit goed is kan de tuinder zijn klimaat als één geheel beschouwen en kan hij dit klimaat geheel naar de behoefte van het gewas instellen zonder zich zorgen te hoeven maken over grote lokale verschillen die daarbij zouden optreden.

Om dit te bestuderen is in de winter van 2010-2011 een meetgrid van 24 sensoren in een raster van 2x5 meter in de kas uitgelegd.

Op basis van deze sensoren kon worden vastgesteld dat op momentane basis de spreiding in de horizontale temperatuurverdeling op gewashoogte (vlak boven de bloemknoppen) binnen een band van 3 °C ligt. De locatie van warmere en koudere plekken is echter niet constant, waardoor er op wat langere termijn een middeling plaatsvindt. Op etmaalbasis zijn de verschillen tussen de warmste en de koudste plaats daardoor ongeveer 2 °C en op weekbasis nog iets minder.

Op een nog wat langere tijdbasis (een paar weken) is het verschil tussen de warmste en koudste plek in een meetveld dat omringd is door warmtewisselaars ongeveer 1 °C.

De gebleken horizontale homogeniteit is goed vergelijkbaar met andere kassen waar gebruik gemaakt wordt van warmtewisselaars voor verwarming en/of koeling. De betreffende tuinder waar de metingen hebben plaatsgevonden is dan ook zeer tevreden met het resultaat van het gebruik van de OPAC voor het kasklimaat.

Een belangrijke voorwaarde om een homogeen klimaat te kunnen realiseren is dat de verschillende warmtewisselaars allemaal een vergelijkbaar koel- of verwarmingsvermogen afgeven. De vergelijkbaarheid van het afgegeven vermogen is bepaald door de uitblaastemperaturen in twee rijen van 22 warmtewisselaars met elkaar te vergelijken. De verschillen in het geleverde koelvermogen bleken klein (+ of – 5%), behalve bij één warmtewisselaar waar de watertoevoer door een knik in de slang gehinderd werd. Met deze constatering is direct het belang van een uitgekiend ontwerp voor de waterzijdige aansluiting van de warmtewisselaars onderstreept. De installatie moet uiteraard in 'Tichelmann' worden aangelegd, maar ook alle scherpe bochten moeten goed worden geïmplementeerd zodat het waterzijdig drukverlies over alle warmtewisselaars gelijk is.

1 H.F. de Zwart en H.J.J. Janssen, 2010, Warmte-overdrachtsprestaties van de OPAC106 warmtewisselaar, Wageningen UR Glastuinbouw, Rapport GTB-1019
2 H.F. de Zwart, 2011, Veroudering van warmtewisselaars in gekoelde kassen, Wageningen UR Glastuinbouw, Rapport GTB-1064

Gegeven de goede efficiëntie van de OPAC106 en de gebleken goede toepassingsmogelijkheden voor de realisatie van een homogeen kasklimaat bij een lage temperatuur van het verwarmingswater is er ook nog gekeken naar het perspectief van de deze warmtewisselaar voor een verdere benutting van geothermische energie. Wanneer namelijk een kassencomplex met een gewoon buisverwarmingssysteem op een geothermische warmtebron wordt aangesloten heeft het water wat vanuit dit kassencomplex naar de infiltratieput van het geothermisch bronnenpaar wordt gestuurd vaak nog een behoorlijk hoge temperatuur (35 tot 40 °C). Dit water zou door 'nageschakelde kassen' die voorzien worden van OPACs verder uitgeoeld kunnen worden.

Berekeningen laten zien dat dit technisch en economisch goed mogelijk is, vooral wanneer het 'eerste' kassencomplex met een relatief kleine aansluitcapaciteit op de geothermische bron is aangesloten (ordegrootte 10 m³/(ha uur)).

De OPACs bieden het meeste perspectief als het 'nageschakelde' kasoppervlak klein is ten opzichte van het 'eerste' kascomplex. Om besparing op de gaskosten voldoende groot te maken ten opzichte van de investering in de OPACs moet het nageschakelde kasoppervlak qua ordegrootte tussen de 30 en 50 m³ geothermische restwarmte per ha per uur kunnen betrekken. Dit betekent dat de oppervlakteverhouding tussen het nageschakelde kasoppervlak en het eerste kassencomplex ergens tussen de 1 op 3 en 1 op 5 zal moeten liggen.

Het blijkt ook dat het economisch rendement van de toepassing van de OPAC warmtewisselaar voor de verdere uitnutting van geothermische warmte verbetert wanneer de OPAC-dichtheid kleiner wordt gekozen dan de één op 80 m² die gebruikt wordt op het bedrijf waar de metingen voor dit onderzoeksproject hebben plaatsgevonden. Qua warmte-overdracht kan deze dichtheid zonder meer verkleind worden, maar er is geen ervaring met de resulterende horizontale homogeniteit van de temperatuur op gewashoogte. Er zal in de praktijk een zekere minimale dichtheid zijn waarbij de verdeling nog acceptabel is. Deze minimale dichtheid kon in het kader van voorliggend project niet worden bepaald en zou dus onderwerp van studie kunnen zijn in geval zich een concrete situatie voordoet waarbij een kas kan worden nageschakeld achter een bestaand kassencomplex dat gebruik maakt van geothermische warmte of een andere vorm van laagwaardige restwarmte.

1 Inleiding

De tuinbouw heeft grote energiebesparings- en verduurzamingsambities. In de invulling van die ambities blijkt de realisatie van 20% duurzame energie het moeilijkste³. Het is dus van groot belang dat er technieken beschikbaar komen waarmee het gebruik van duurzame energie vergemakkelijkt wordt. Warmtewisselaars die kaslucht met lage watertemperaturen kunnen verwarmen zonder dat daarbij veel elektriciteit te gebruiken is één van die technieken. Deze warmtewisselaars geven een goede mogelijkheid om met een warmtepomp de kas te verwarmen, vooral ook omdat met dezelfde warmtewisselaars in de zomer warmte kan worden verzameld om de laagwaardige warmtebron (een bronnenpaar in een ondergrondse aquifer) weer te regenereren. Warmtewisselaars die laag temperatuur verwarming mogelijk maken kunnen ook bijdragen in een verbetering van de benuttingsgraad van geothermische warmtebronnen. Ook kan zo'n warmtewisselaar het thermisch rendement van stookinstallaties en WKK verbeteren door een effectievere benutting van de warmte uit de condensor en de intercooler (bij WKK).

In het voorliggende project worden een aantal aspecten van zo'n energiezuinige warmtewisselaar besproken. Het betreft de OPAC106, een speciaal voor de tuinbouw ontwikkelde warmtewisselaar die een compacte inbouwmaat combineert met een hoge warmte-overdracht bij een laag elektriciteitsverbruik voor de luchtcirculatie.

Het gekozen materiaal waarvan de warmtewisselaar is gemaakt geeft vertrouwen op een technische levensduur van tien jaar⁴. Overigens zal het schoonmaken van de koeler na verloop van een paar jaar wel steeds voorzichtiger moeten plaatsvinden omdat de dunne aluminium lamellen gaandeweg brosser zullen worden.

De OPAC106 warmtewisselaar is vanaf de zomer van 2010 op een rozenbedrijf operationeel, zowel voor verwarming als voor koeling. In de koelfunctie zorgt de koeler voor een gunstig klimaat voor de teelt van rozen in het top-segment. De warmte die met de koeling wordt verzameld is bestemd voor de regeneratie van een aquifer die in de winter weer wordt ontladen ten behoeve van de kasverwarming.

In een voorgaande studie⁵ is getoond dat de OPAC106 in staat is het koel- en verwarmingsvermogen te leveren bij een relatief laag elektriciteitsverbruik voor de ventilator. Ten behoeve van genoemde studie is ook een simulatiemodel voor de OPAC warmtewisselaar gemaakt dat de prestatie van de wisselaar berekent als functie van de relevante omgevingsfactoren (kasluchttemperatuur en -vochtigheid) en stuurvariabelen (watertemperatuur, water- en luchtdebiet). Typische werkomstandigheden in de verwarmingsmode zijn een aanvoertemperatuur van 30 °C, een watercirculatie-debiet van 0.8 m³/uur en een luchtdebiet van 2500 m³/uur per OPAC. Bij een kasluchttemperatuur van 22 °C levert elke OPAC in dat geval zo'n 3.5 kW aan verwarmingsvermogen. De uitstromende watertemperatuur is dan 26 °C.

In de koel-modus zijn de typische waarden voor het gebruik een koelwatertemperatuur van 10 °C bij een kasluchttemperatuur van 27 °C en een luchtvochtigheid van 75%. Bij een waterdebiet van 1.6 m³/uur en een luchtdebiet van 3000 m³/uur wordt het koelwater naar ruim 18 °C opgewarmd en wordt de lucht met 19.4 °C uitgeblazen. Het koelvermogen is dan 12.7 kW, wat voor 50% via de afvoer van latente warmte verloopt. Er stroomt daarbij 12.5 liter condenswater per uur uit de koeler.

Grotere koel- en verwarmingsvermogens zijn mogelijk door het ventilatortoerental en/of het waterdebiet te vergroten of bij een groter temperatuurverschil tussen aanvoerwater en ingaande kasluchttemperatuur. Hierdoor kan het af te geven vermogen nauwkeurig worden geregeld. Bij gebruik van de warmtewisselaar voor koeling is het een prettige bijkomstigheid dat bij oplopende kasluchttemperatuur, en daarmee een oplopende koelbehoefte, het koelvermogen vanzelf snel oploopt. In de verwarmingsmode is dit effect ook aanwezig (bij afnemende kasluchttemperatuur neemt het verwarmingsvermogen toe), maar minder sterk omdat bij verwarming de latente warmte geen rol speelt.

3 Breukers, A., P. Smit, M. Ruijs, J. Buurma en O. Hietbrink, 2011, 2020: Energiedoelen gehaald; De weg die de glastuinbouw nog te gaan heeft, LEI, Wageningen UR.

4 Zwart, H.F. de, 2011, Veroudering van warmtewisselaars in gekoelde kassen, Wageningen UR Glastuinbouw, Rapport GTB 1064

5 Zwart, H.F. de en H.J.J. Janssen, 2010, Warmte-overdrachtsprestaties van de OPAC 106 warmtewisselaar, Wageningen UR Glastuinbouw, rapport GTB 1019

Een belangrijk aspect van het gebruik van warmtewisselaars zoals de OPAC106, is dat het koel- en verwarmingsvermogen vanuit de warmtewisselaar moet worden verdeeld over een aanzienlijk kasoppervlak. In de situatie bij Porta Nova was er één warmtewisselaar per 80 m² opgehangen. In de winter van 2010-2011 is de homogeniteit van de temperatuur in de kas bepaald door met een meet-dichtheid van 1 sensor per 10 m² horizontale temperatuurverschillen in beeld te brengen. Actuele horizontale temperatuurverschillen beliepen een range van 1.5 °C boven en onder het gemiddelde. Voor het teeltresultaat zijn het echter vooral verschillen over langere termijn die een invloed hebben op de groei en ontwikkeling van het gewas. Hoofdstuk 3 bespreekt de achtergrond en de interpretatie van de meetresultaten uit dit meetgrid.

In de zomer van 2011 is gekeken naar onderlinge verschillen in koelvermogen tussen verschillende warmtewisselaars. Immers, er zitten honderden parallel aangesloten warmtewisselaars op één meengroep, waarbij verondersteld wordt dat deze allemaal hetzelfde doen. Deze homogeniteit wordt besproken in hoofdstuk 4

Uit de bevindingen bij Porta Nova blijkt dat de OPAC warmtewisselaar goed voldoet voor de verwarming van kassen met een lage temperatuur aanvoerwater. Als extra toevoeging aan dit onderzoeksproject is daarom gekeken naar het perspectief voor het gebruik van deze warmtewisselaars voor de verdere uitnutting van geothermie. Bij de exploitatie van geothermische warmte betekent elke graad waarmee het geothermische water verder kan worden uitgeoeld een verhoging van het exploitatierendement. Tegen deze achtergrond is hoofdstuk 5 geschreven.

Het rapport eindigt met een aantal algemene conclusies.

2 Horizontale temperatuur-homogeniteit

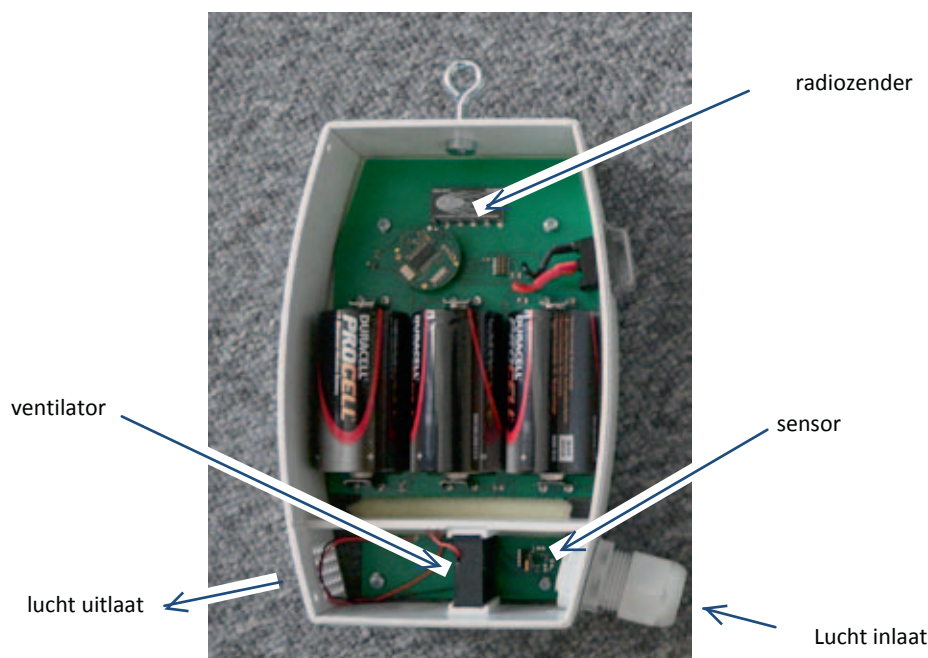
De kenmerkende eigenschap van het gebruik van luchtbehandelingssystemen voor de verwarming van kassen is dat er een beperkt aantal verwarmingsunits per m² kas staan. In het geval van Porta Nova gaat het om 1 unit per 80 m². Het is dan natuurlijk de vraag in welke mate het verwarmingsvermogen dat door deze units wordt afgegeven de warmte homogeen over dit oppervlak kan verdelen. Een gelijkmatige groei van het gewas en een goede stuurbaarheid van het kasklimaat vereisen immers een homogene temperatuurverdeling.

Om een beeld van deze homogeniteit te verkrijgen is gedurende de periode van 30 november tot 25 januari de temperatuur op een 26-tal punten gevolgd, verdeeld over een oppervlak van 300 m². Er is gekeken naar de mate waarin de temperaturen in die punten (allemaal op bloemhoogte, dus vlak boven het gewas) afwijken ten opzichte van het gemiddelde. Zijn de afwijkingen gemiddeld genomen klein (+ of – 1 °C over een periode van bijvoorbeeld een week) dan wordt de temperatuurverdeling als voldoende goed getypeerd. Is deze afwijking groter, of wanneer zich vaak extreme afwijkingen voordoen, dan is de temperatuurverdeling die met deze warmtewisselaars in de winter wordt gerealiseerd zorgelijk.

In dit hoofdstuk wordt eerst de meetopstelling besproken en worden vervolgens de resultaten gepresenteerd. Tot slot worden er conclusies getrokken.

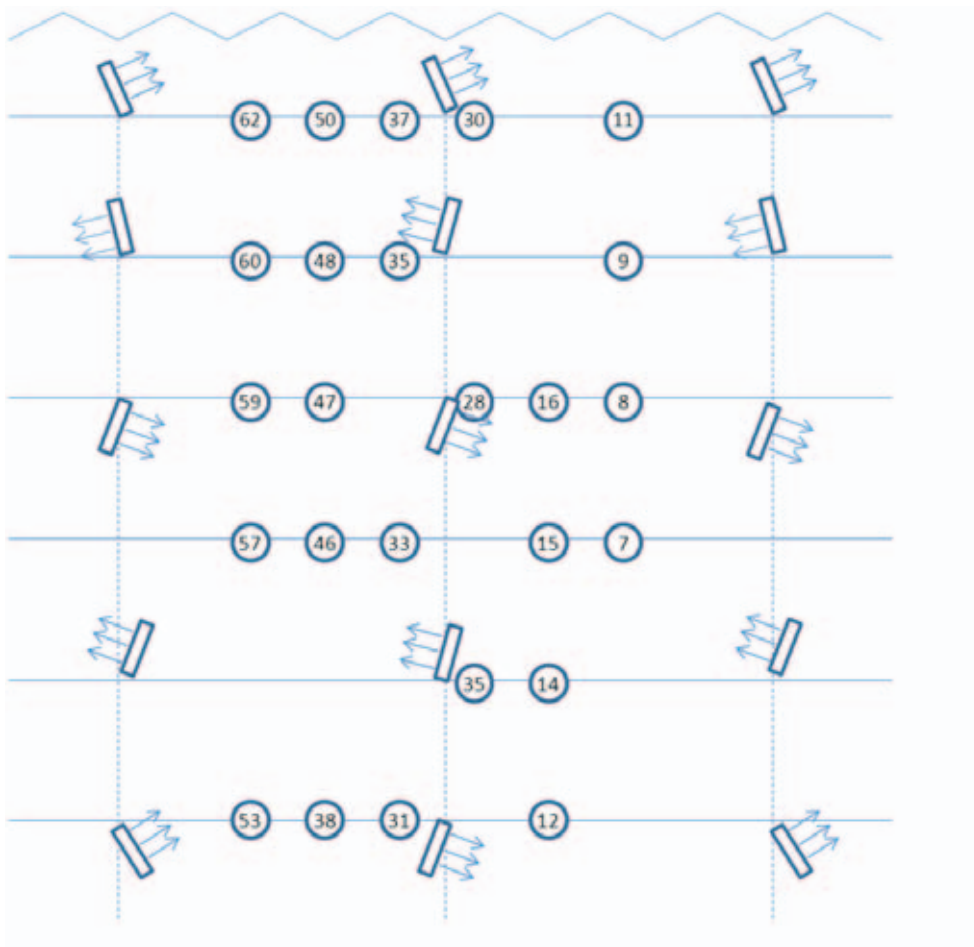
2.1 Meetopstelling

De metingen zijn uitgevoerd met een draadloos meet-netwerk. De kern van het meetinstrument bestaat uit een geventileerde temperatuur- en luchtvochtigheidsvoeler. Op het moment van de meting wordt de ventilator gestart zodat de ruimte waarin de opnemer zit dezelfde temperatuur krijgt als zijn omgeving. Het effect van straling wordt hierdoor geminimaliseerd. De ventilator blijft draaien totdat de meetwaarde niet meer verandert (meestal 5 tot 10 seconden) en dan wordt de meetwaarde doorgegeven en vastgelegd in een logfile.



Figuur 2.1. De gebruikte sensoren voor de meting van de horizontale temperatuurverdeling.

Voordat de sensoren op hun plaats werden gehangen zijn ze gedurende een uur bij elkaar in een doos gestopt. In zo'n doos is de temperatuur overal gelijk zodat de sensoren ten opzichte van elkaar geijkt kunnen worden. Aan het eind van de meetperiode (25 januari) zijn de sensoren opnieuw bij elkaar in een doos gedaan en opnieuw ten opzichte van elkaar geijkt. Van de 36 sensoren waarmee het experiment begonnen is kregen in de loop van de meetperiode een paar sensoren problemen met de batterijen. Ook waren er sensoren waarvan de ijkwaarde op 25 januari heel sterk verschilde ten opzichte van de ijkwaarde op 30 november (meer dan een graad verandering in offset), waardoor deze sensoren als onbetrouwbaar gekwalificeerd zijn. Al met al waren er 25 sensoren die de betreffende periode een betrouwbaar meetsignaal hebben gegeven. Onderstaande overzicht toont de verdeling van deze sensoren over een deel van de kas bij Porta Nova. Het gaat om een stuk met een oppervlak van $1 \times$ de traliebreedte en $5 \times$ de pootafstand. Het gebied staat onder invloed van 8 warmtewisselaars, namelijk de warmtewisselaars die lucht in de richting van het meetgebied blazen.

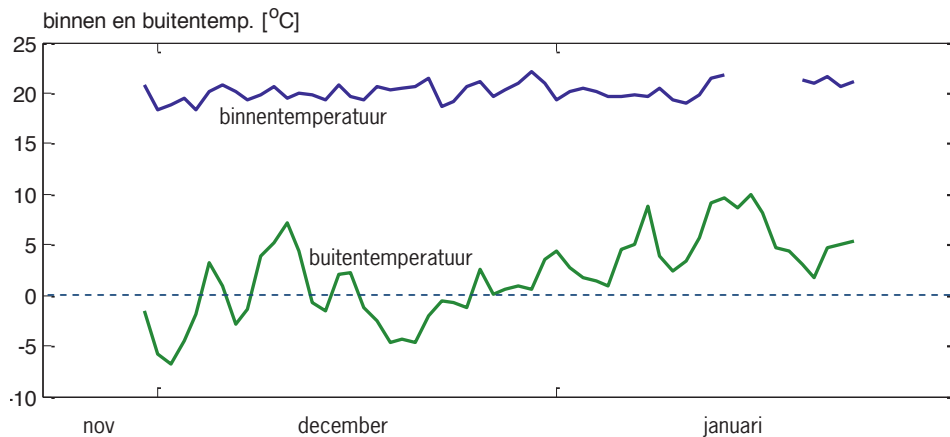


Figuur 2.2. Overzicht van de plaatsing van de sensoren ten opzichte van de warmtewisselaars en hun uitblaasrichting.

Gedurende de meetperiode zijn de data elke ochtend verwerkt tot plaatjes die een 2 dimensionaal beeld gaven van de temperatuurverdeling in dit meetveld. Op allerlei momenten van de dag waren lokale temperatuurverschillen van 2 tot soms wel 3 graden te zien, maar over een wat langere periode werden temperatuurverschillen in het horizontale vlak uitgemiddeld. De volgende paragraaf gaat hier nader op in.

2.2 Resultaten

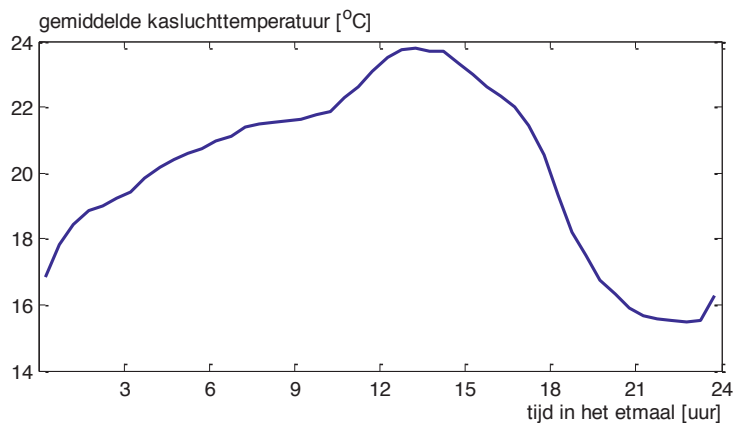
Onderstaande figuur toont de gemiddelde binnen- en buitentemperatuur die in de periode van 30 november tot 25 januari is gemeten.



Figuur 2.3. Buitentemperatuur en binnentemperatuur als etmaalgemiddelde gedurende de meetperiode van 30 november tot en met 25 januari. Halverwege januari ontbreken de meetdata van enkele dagen door een storing van de meet-pc.

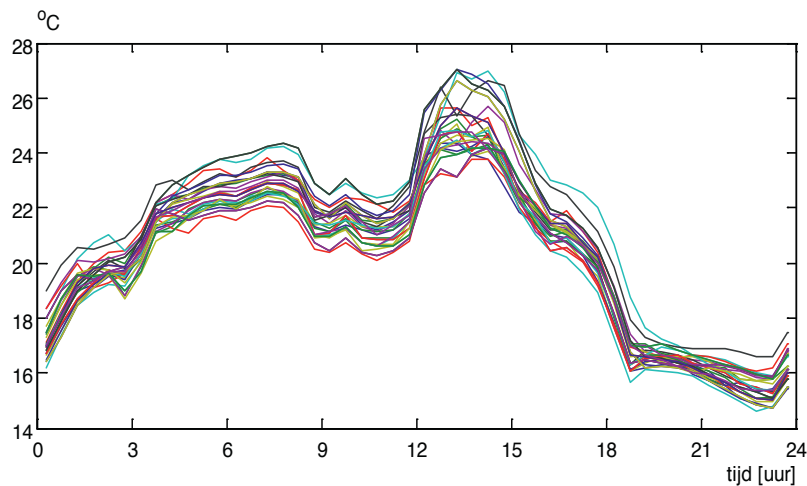
De etmaaltemperatuur in de kas varieert tussen de 18 en 22 °C. Deze variatie is duidelijk niet gerelateerd aan de buitentemperatuur. De variatie komt vooral voort uit veranderingen die de tuinder aanbrengt in de instellingen van zijn kasklimaatcomputer (vooral de temperatuur na middernacht tot in de vroege ochtend wordt nogal eens veranderd).

Karakteristiek voor het kasklimaat in deze tuin is de hoge temperatuur in de middag, gevolgd door een scherpe afkoeling in de avond. Het gemiddelde verloop over het etmaal wordt getoond in Figuur 2.4.



Figuur 2.4. Gemiddeld temperatuurverloop over het etmaal in de betreffende meetperiode.

De kwaliteit van het verwarmingssysteem in de kas kan worden beoordeeld door te kijken in welke mate de temperaturen op de verschillende plaatsen afwijken van het gemiddelde. In Figuur 2.5. zijn alle 25 temperaturen over het etmaal van 20 december 2010 getoond. 20 December was een frisse winterdag (gemiddelde temperatuur -4.3°C) met overdag wat zon. De ventilatoren draaiden tijdens deze periode op een laag toerental (40%). Dit is de gebruikelijke werkwijze die de hele winter op deze tuin is toegepast.

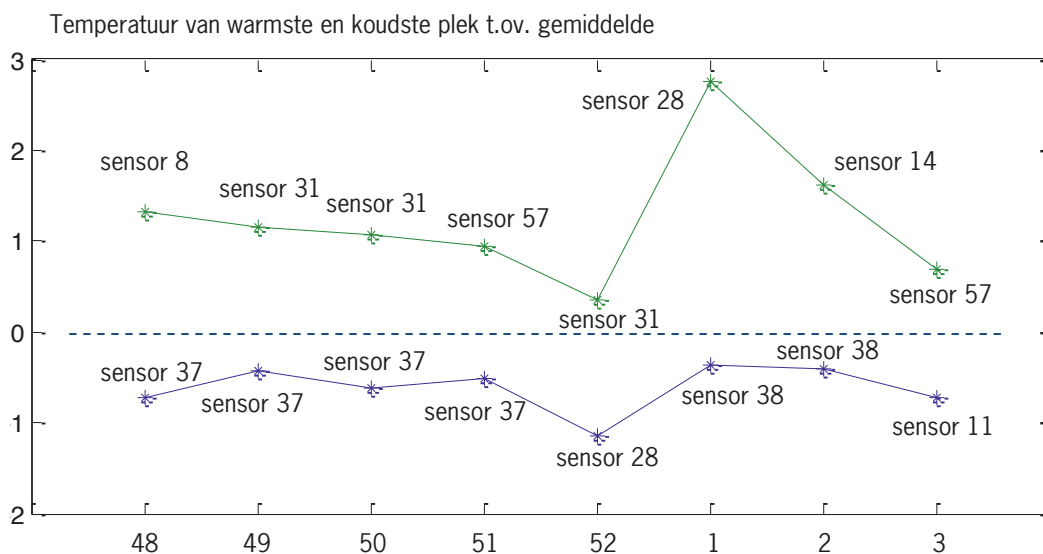


Figuur 2.5. Temperatuurverloop van alle 25 meetpunten op 20 december.

De momentane temperatuurverschillen liggen het hele etmaal binnen een bandbreedte van 2°C (dus $+1$ of -1°C ten opzichte van het gemiddelde). De hoogste gemiddelde etmaaltemperatuur op deze dag was 21.6°C (sensor 57) en de laagste temperatuur was 19.8°C (sensor 37). Over een wat langere termijn van bijvoorbeeld een week zal het verschil tussen de warmste en de koudste plaats in de regel wat kleiner zijn wanneer de warme en koude gebieden 'wandelen' over het meetveld (dus niet steeds op dezelfde plaats liggen). Dit is te zien in Figuur 2.6.

In de meeste weken is het verschil tussen de warmste en de koudste plaats gemiddeld over de week minder dan 2 graden. De uitzondering is week 1, waar er 3 graden verschil zit tussen de warmste plaats (in die week is dat bij sensor 28) en de koudste plaats (die week bij sensor 38).

Temperatuur van warmste en koudste plek t.ov. gemiddelde.



Figuur 2.6. Temperatuurverloop van alle 25 meetpunten op 20 december.

Figuur 2.6. laat ook zien dat het niet steeds dezelfde plaats is die het koudste of het warmste is, hoewel sensor 37 wel vaak de koudste plek is. Tevens toont de grafiek dat de afwijkingen ten opzichte van het gemiddelde wat meer aan de bovenkant liggen dan aan de onderkant. De grote spreiding komt dus meestal omdat het op een paar plaatsen wat warmer is, dan doordat het op een paar plaatsen wat kouder is.

Omdat de warmste en koudste plaatsen door de tijd heen verschuiven zullen temperatuurverschillen over de langere perioden kleiner zijn dan over korte perioden van een week of een dag. Bekijken we de gehele meetperiode dan is het verschil tussen de warmste en koudste plaats gedaald naar 1 °C. De koudste plaats ligt bij sensor 37 en de warmste plaats ligt bij sensor 31.

2.3 Conclusie

Bij de verwarming van kassen treden horizontale temperatuurverschillen op. Dit komt doordat de warmte-input en het warmteverlies niet overal hetzelfde is. De temperatuurverschillen zullen luchtstromingen opwekken die ertoe kunnen leiden dat de verschillen nog verder toenemen ten gevolge van kouval. De strenge eisen t.a.v. groenlabel certificering geven aan dat temperatuurverschillen van 1.5 °C tussen de warmste en de koudste plek in een kasafdeling (max 4000 m²) acceptabel zijn.

In alle rapportages rond kassen die (deels) verwarmd worden met een verwarmingssysteem dat op het inblazen van warme lucht gebaseerd is blijken de horizontale temperatuurverschillen meestal meer dan 2 °C te zijn⁶.

Het rapport dat eerder over de klimaatverdeling berichtte, onder andere bij Porta Nova, toont temperatuurverschillen die tijdens verwarmen vaak wat minder dan 2 °C zijn (J.P. van de Kolk *et al.* 2010, Onderdoor en bovendoor koelen en verwarmen met luchtunits in roos, DLV-Plant, Wageningen).

De resultaten die afgelopen winter met het gebruik van de OPAC 106 warmtewisselaars voor de verwarming van een kas zijn behaald laten een iets grotere variatie zien. Wellicht komt dit doordat de ventilatoren de afgelopen winter alleen maar op een laag toerental zijn gebruikt (40%).

Op etmaalbasis zijn de verschillen tussen de warmste en de koudste plaats ongeveer 2 °C, op weekbasis iets minder en op langere tijdbasis (een paar weken) is het verschil tussen de warmste en koudste plek in een meetveld dat omringd is door warmtewisselaars ongeveer 1 °C.

De conclusie uit de metingen van deze winter is dan ook dat de OPAC106 qua horizontale temperatuurverdeling iets grotere temperatuurverschillen laat zien dan de verschillen die eerder in deze kas met de FiWiHEX warmtewisselaars zijn gemeten. Deze FiWiHEX warmtewisselaars draaiden overigens meestal op een hoger toerental (60 tot 80%). Vergeleken met veel andere kassen die door middel van luchtbehandelingskasten worden verwarmd levert de OPAC 106 echter een homogener klimaat.

De betreffende tuinder geeft aan dat hij de temperatuurverdeling in de kas als zeer goed ervaart. Hij geeft aan geen last te hebben van koude of warme plekken en kan zijn kasafdeling dus bij de klimaatregeling als één homogeen blok beschouwen en de klimaatinstellingen kiezen zonder rekening te houden de consequenties daarvan voor moeilijk plekken.

6 De Zwart, H.F., F. van Noort & J.C. Bakker, 2008, Energieprestatie en teeltkundige ervaringen in de energieproducerende kas; Eindrapport van een 2 jaar durend praktijkexperiment, Wageningen UR

3 Evenwichtigheid van koelvermogen

Temperatuurverschillen in de kas worden veroorzaakt door lokale verschillen in de balans tussen verwarmend en koelend vermogen. Het is dan ook van groot belang dat de warmtewisselaars overeenkomende uitblaas-temperaturen laten zien. Om dit te bestuderen is in de zomerperiode gedurende een korte periode gemeten aan de uitblaas-temperaturen van 44 warmtewisselaars (2 rijen met elk 22 wisselaars).

Er is gebruik gemaakt van dezelfde opnemers die in paragraaf 3.1 zijn gebruikt en ook deze keer zijn de opnemers eerst bij elkaar in een doos geplaatst om systematische verschillen te kunnen elimineren.

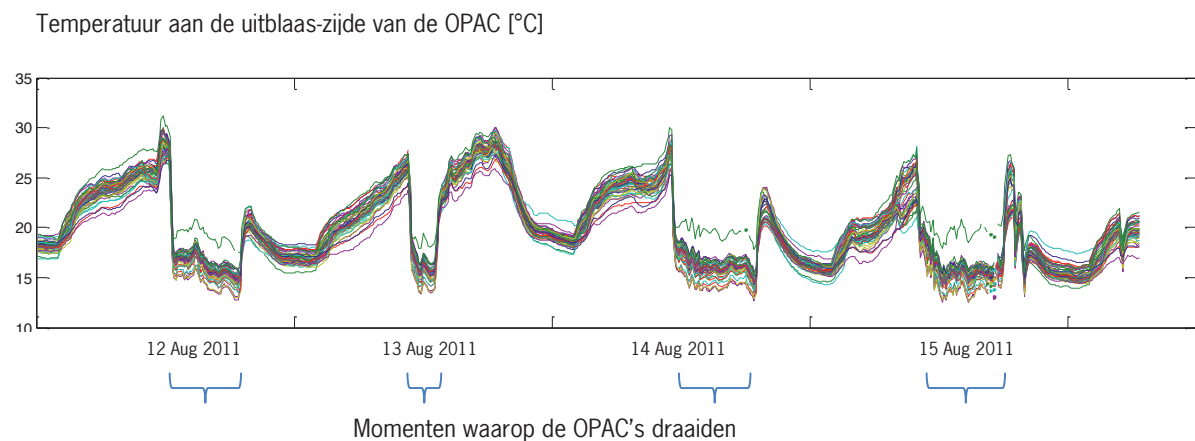
3.1 Resultaten

De metingen hebben plaatsgevonden in de periode van 12 augustus tot 16 september, maar de koelfunctie is na 26 augustus niet meer gebruikt. De temperatuuropnemers zijn in de uitblaasopening van de OPACs geplaatst.



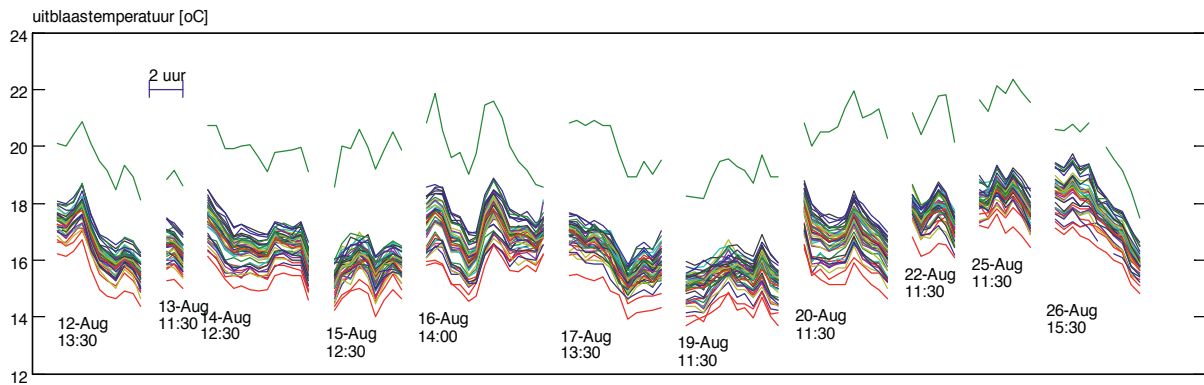
Figuur 3.1. Plaatsing van de temperatuuropmeter in de uitblaasopening van de OPAC.

Onderstaande grafiek toont het verloop van de meetresultaten over de eerste 4 dagen. Er zijn duidelijk vier perioden in de grafiek te zien waar de OPACs zijn gaan draaien. De luchttemperatuur aan de uitblaaszijde van de OPAC zakt dan opeens naar beneden. De grafiek laat zien dat de temperaturen in een nauwe band terecht komen met uitzondering van één sensor. Analyse van de situatie ter plaatse liet zien dat dit het gevolg was van een afgeknelde wateraanvoerslang, waardoor de waterzijdige doorstroming sterk belemmerd werd.



Figuur 3.2. Meetresultaten over de eerste 4 dagen.

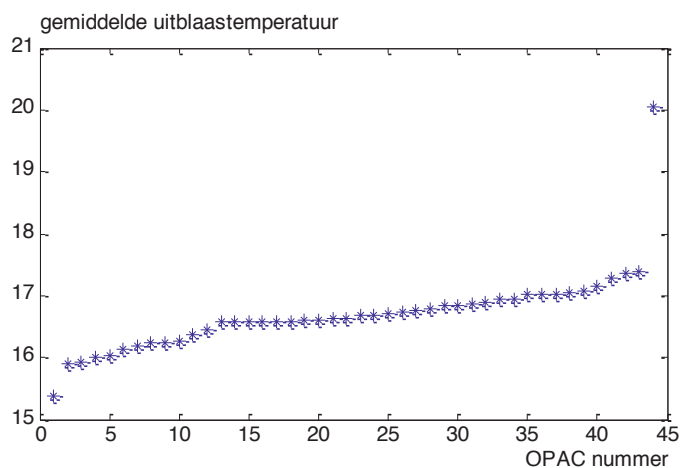
In Figuur 3.3. is een samenvatting gemaakt van de data over een langere periode en laat alleen stukjes zien waar de OPACs draaiden. De weergegeven temperaturen zijn half-uur gemiddelden. Ook hier valt de ene afwijkende uitblaasttemperatuur heel sterk op. Deze metingen benadrukken daarmee indirect het belang van een zorgvuldige uitvoering van het waterzijdig circuit. Hierin moet voorkomen worden dat slangen kunnen dichtknikken, wat in het voorliggend praktijkexperiment de reden voor de grote afwijking bleek te zijn.



Figuur 3.3. Samenvatting van de meetresultaten door alleen de stukjes uit de data te pakken waarop de OPAC's hebben gedraaid.

De conclusie die uit de metingen kan worden getrokken is dat de OPACs een goede verdeling van het koelvermogen leveren. Immers, in de aangezogen lucht ligt de spreiding van de temperaturen op ongeveer 2 °C (omdat dat de natuurlijke variatie van temperatuurverschillen in een kas is, zeker in de dagperiode, en de spreiding in de uitgeblazen lucht blijft binnen een band van 3 °C (met uitzondering van de temperatuur uit die ene afwijkende OPAC). Gegeven het feit dat de lucht ongeveer 10 °C lager wordt uitgeblazen dan dat de lucht wordt aangezogen betekent een toename van 1 graad in de bandbreedte dat het koelvermogen van de individuele OPACs + of – 5% afwijkt ten opzichte van het gemiddelde.

Onderstaande figuur toont de gemiddelde uitblaasttemperatuur per OPAC over de 11 stukjes meetdata die in Figuur 3.3. zijn getoond. Samen beslaan de stukjes 60 uur koeling.



Figuur 3.4. Gemiddelde uitblaasttemperatuur van de 44 OPACs over de 60 koeluren van 12 tot 26 augustus.

Figuur 3.4. laat zien dat gemiddeld genomen de variatie in uitblaastemperaturen nog weer een stuk kleiner is dan de bandbreedte van 2 tot 3 °C die in de vorige figuren naar voren kwam. Één OPAC koelt duidelijk wat meer dan de rest, één koelt een heel stuk minder goed (daarover is al meer gezegd) en de overige 42 OPACs blazen lucht uit met een gemiddelde temperatuur tussen de 15.8 en 17.4 °C.

3.2 Conclusie

Een belangrijke voorwaarde om een homogeen klimaat te kunnen realiseren is dat de verschillende warmtewisselaars allemaal een vergelijkbaar koel- of verwarmingsvermogen afgeven. De vergelijkbaarheid van het afgegeven vermogen is bepaald door de uitblaastemperaturen in twee rijen van 22 warmtewisselaars met elkaar te vergelijken.

In de koel-modus is de temperatuurvariatie in de aangezogen lucht + of – 1 graad ten opzichte van het gemiddelde (omdat dit de natuurlijke variatie in kasluchttemperaturen is) en de variatie in de uitgeblazen lucht + of – 1.5 graad. Gegeven het feit dat de koelers de lucht zo'n 10 °C afkoelen is de variatie in het koelvermogen per OPAC dus + of - 5%. Tijdens de meetperiode werd van 1 van de 44 OPAC's die gemeten zijn geconstateerd dat deze onderpresteerde. Dit kan worden veroorzaakt door een gedeeltelijk geblokkeerde waterdoorstroming of een overmatige luchtzijdige vervuiling. Inspectie liet zien dat het hier het eerste betrof.

Met deze constatering is gelijk het belang van een uitgekiend ontwerp voor de waterzijdige aansluiting van de warmtewisselaars onderstreept. De installatie moet natuurlijk in 'Tichelmann' worden aangelegd, maar ook alle scherpe bochten moeten goed worden geïmplementeerd zodat het waterzijdig drukverlies over alle warmtewisselaars gelijk is.

4 De OPAC 106 voor verwarming met geothermie

Bij de benutting van geothermische warmte is de hoeveelheid energie die aan een bron kan worden onttrokken recht evenredig met de uitkoeling van het warme water. Het vergroten van de uitkoeling van dit water leidt dus direct tot een vergroting van de verwarmingscapaciteit van een geothermische bron en dus tot een vergroting van het kasoppervlak dat door zo'n bron kan worden verwarmd.

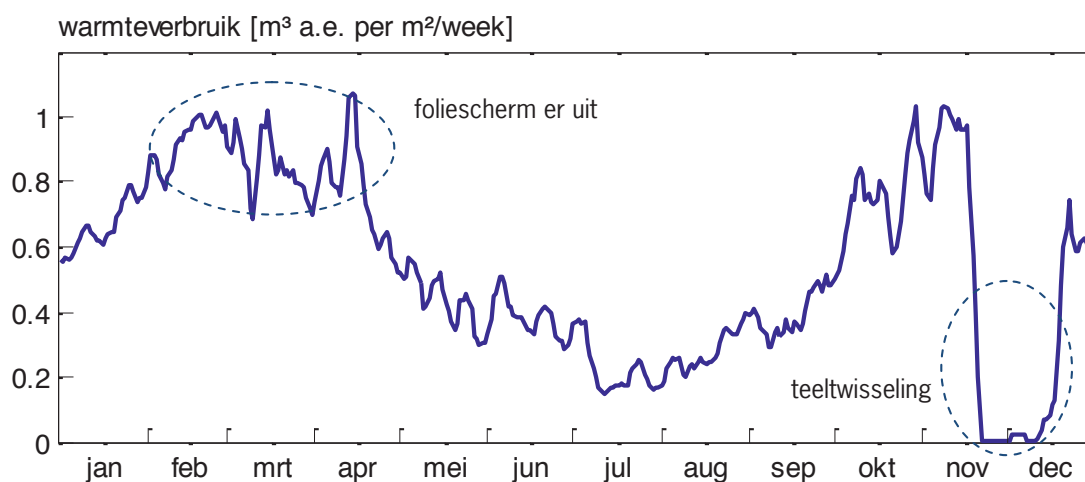
In dit hoofdstuk wordt uiteengezet welke rol de OPAC warmtewisselaar in deze vergroting van de benutting van geothermische warmte kan spelen. Daarvoor wordt eerst een redenering gegeven voor de wijze waarop zo'n warmtewisselaar kan worden ingepast en wordt vervolgens doorgerekend wat de energetische consequenties daarvan zijn.

4.1 Inpassing van de warmtewisselaar

Geothermie zal het eerst renderen op bedrijven zonder assimilatiebelichting omdat voor belichtende bedrijven het gebruik van de WKK voor de dekking van de eigen stroombehoefte tot een hoge dekkingsgraad van de warmtebehoefte uit eigen afvalwarmte leidt. Daarom wordt in dit hoofdstuk gerekend aan de toepassing van de OPAC106 als verwarmingssysteem voor een onbelichte groenteteelt.

Voor dit bedrijf is verondersteld dat er gebruik gemaakt wordt van een energiezuinige kas omdat tegen de tijd dat geothermie echt in ontwikkeling komt de waarde van warmte wat hoger ligt dan op dit moment. Bij een hogere waarde van warmte kan ervan worden uitgegaan dat kassen volop gebruik zullen maken van een goede isolatie, bijvoorbeeld door het gebruik van een dubbele scherm-installatie en van ontvochtiging met buitenluchtaanzuiging.

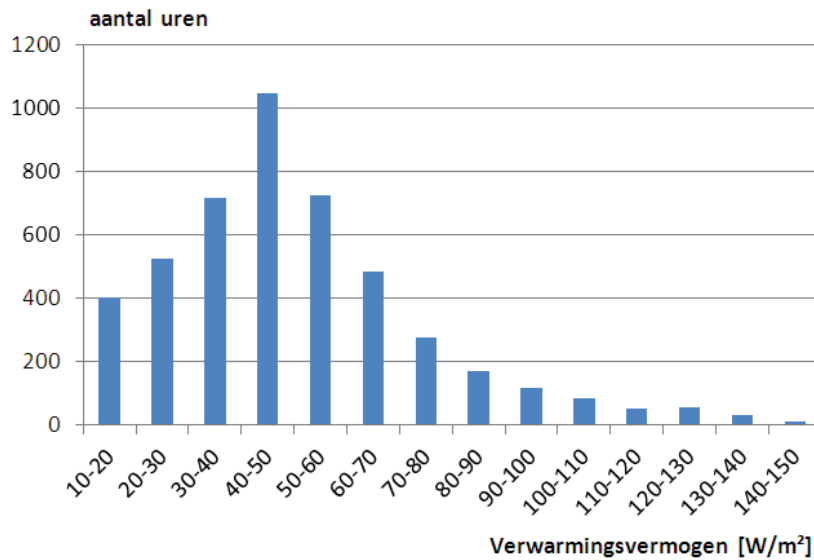
Onderstaande figuur toont de warmtevraag van zo'n bedrijf door het jaar heen.



Figuur 4.1. Warmteverbruik van een energiezuinig tomatenbedrijf.

Het totale warmteverbruik van dit bedrijf is 29 m^3 aardgas equivalenten per m^2 per jaar. Dit is nog lang niet het laagst mogelijke warmteverbruik, wat vooral te zien is aan het verbruik in de zomermaanden. Er wordt namelijk nog steeds gebruik gemaakt van een minimumbuistemperatuur in de ochtenduren. Deze keus is gemaakt omdat bij gebruik van geothermische warmte de warmte in de zomer praktisch gratis is en overvloedig aanwezig.

De warmtevraag van zo'n bedrijf kan ook afgebeeld worden als een histogram waarin wordt getoond hoeveel uur per jaar een bepaald verwarmingsvermogen gevraagd wordt.

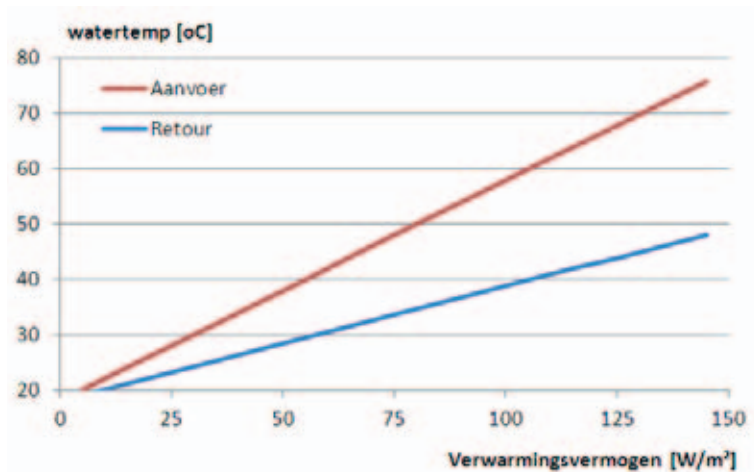


Figuur 4.2. Verdeling van de vraag naar verwarmingsvermogen in een zuinige groentekas.

De grafiek laat zien dat een verwarmingsvermogen tussen de 40 en 50 W/m² de meest voorkomende verwarmingscapaciteit is. De som van alle uren is 4700, zodat geconcludeerd kan worden dat de verwarming in de kas ruim 4000 uur per jaar niet gebruikt wordt.

Het verwarmingsvermogen in een kas wordt meestal via een buisverwarmingssysteem gerealiseerd. Bij een bepaalde buisdiameter en een bepaald aantal buizen kan het verwarmingsvermogen worden vertaald naar een aanvoer- en retourtemperatuur. Hierbij speelt ook het circulatiedebiet een rol. Als het circulatiedebiet groot is, is het verschil tussen aanvoer en retourtemperatuur in het verwarmingssysteem klein en vice versa. Bij systemen waar het van belang is de retourtemperatuur laag te krijgen moet er in de eerste plaats gekozen worden voor een groot verwarmend oppervlak en moet het temperatuurverschil tussen aanvoer- en retourtemperatuur groot gemaakt worden. Dit vereist dat het water langzaam door het verwarmingsnet moeten stromen.

Onderstaande grafiek laat de aanvoer- en retourtemperaturen zien van een verwarmingssysteem dat gebaseerd is op een buisrailsysteem dat uit 57 mm buizen bestaat (10 buizen op een 8 meter kap) en daarnaast nog een groeibuis heeft (2.5 buizen van 28 mm op een 8 meter kap). Verder is er gerekend met een kasluchttemperatuur van 18 °C en een omlooptijd van 45 minuten in de beide verwarmingscircuits.



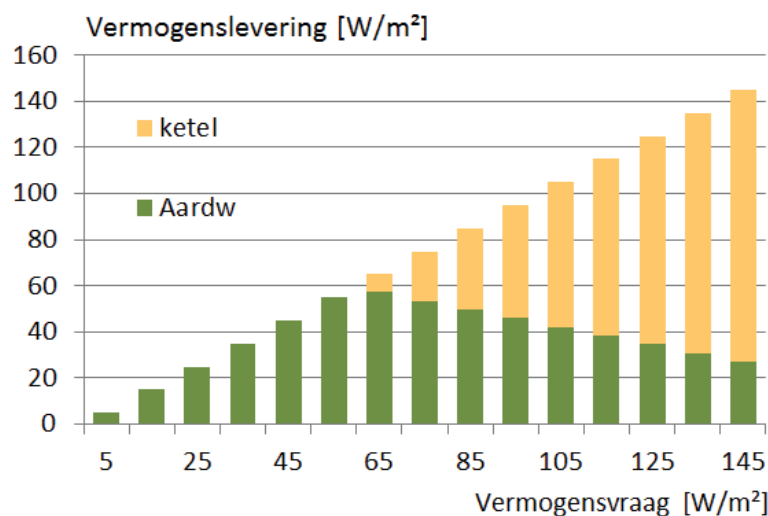
Figuur 4.3. Aanvoer en retourwatertemperaturen in een kasverwarmingsstelsel als functie van het gevraagde vermogen. Het verwarmingsnet is iets vergroot ten opzichte van de huidige standaard door 57 mm buizen in het ondernet te plaatsen in plaats van de gebruikelijke 51 mm buizen.

Indien een kas wordt aangesloten op een geothermie infrastructuur kunnen de aanvoerwater temperatuur en het aanvoerwaterdebiet de beperkende factoren zijn.

In projecten waar op dit moment geothermische warmte wordt toegepast ligt de aanvoerwatertemperatuur rond de 65 °C. Volgens Figuur 4.3. kan de kas bij deze aanvoerwatertemperatuur 125 W/m² verwarmingsvermogen leveren en is de retourtemperatuur dan ongeveer 44 °C.

Het waterdebiet dat nodig is om 125 W/m² te leveren bij een temperatuurverschil van 21 °C bedraagt 51 m³/(ha uur). In het algemeen zullen kassen die op geothermie worden aangesloten een veel kleinere aansluitcapaciteit op de geothermische warmtebron hebben (ordegrootte 15 m³/(ha uur)), zodat de beperking meestal op het debiet zal liggen en niet op de temperatuur.

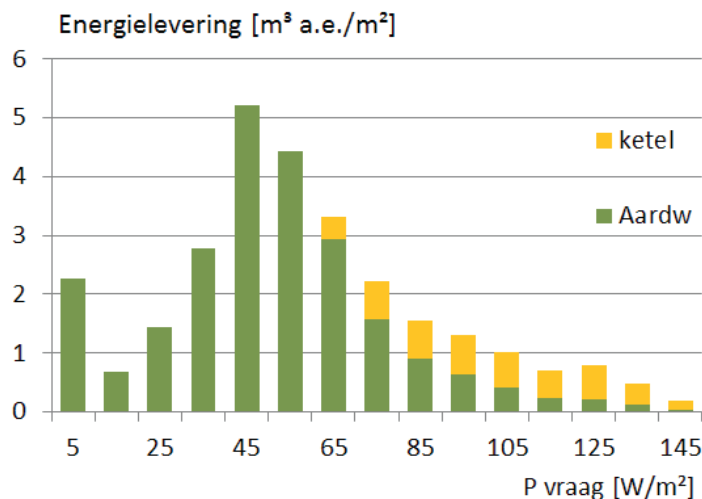
Wanneer voor alle 15 vermogensklassen die in Figuur 4.2. zijn afgebeeld wordt uitgerekend welk aandeel de geothermische warmtebron kan leveren en welk aandeel additioneel moet worden ingevuld dan ontstaat de volgende figuur, geldend voor een geothermie-bron met een aanvoerwatertemperatuur van 65 °C en een maximaal aanvoerdebiet van 15 m³/(ha uur).



Figuur 4.4. Bijdrage van de geothermie-bron en de ketel bij de invulling van de verwarmingsbehoefte bij verschillende vermogensklassen. De geothermische warmte heeft een aanvoertemperatuur van 65 °C en een maximaal debiet van 15 m³/(ha uur).

Figuur 4.4. laat zien dat de geothermische bron met de genoemde capaciteit de kas voor 100% van warmte kan voorzien tot en met de vermogensklassen van 50-60 W/m². Daarboven moet een steeds groter deel van het vermogen door de ketel worden geleverd.

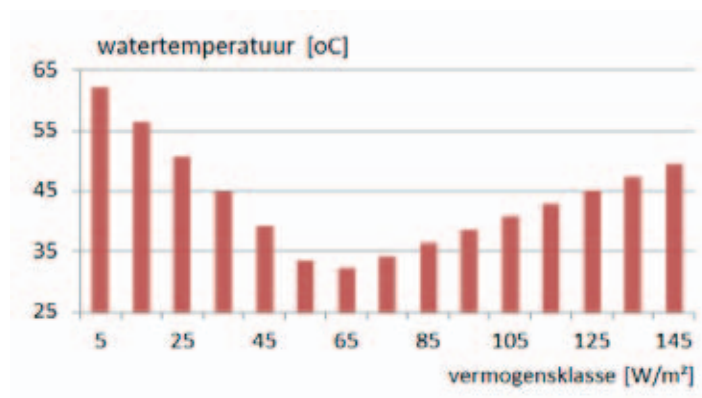
Wanneer de data van Figuur 4.4. wordt gecombineerd met het aantal uren dat de kas warmte in de verschillende vermogensklassen gebruikt (Figuur 4.2.), dan ontstaat een figuur waaruit kan worden afgelezen hoeveel energie door de geothermische bron wordt geleverd en hoeveel additioneel door de ketel moet worden geleverd.



Figuur 4.5. Energielevering vanuit de aardwarmtebron en vanuit de ketel voor de verschillende vermogensklassen. De geothermische bron levert water van 65 °C met een aanvoerwaterdebiet van 15 m³/(ha uur) aan een energiezuinige groentekas.

De som van de energielevering door de aardwarmtebron is in dit geval 24.4 m³ aardgas equivalenten en de ketel levert 4.6 m³ aardgas equivalenten.

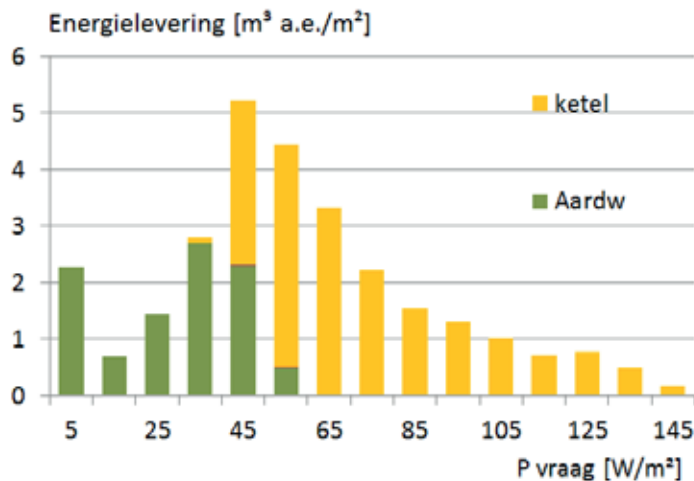
Het water uit de geothermie-bron dat door de kas wordt uitgeoeld is echter nog lang geen koud water. In de lage vermogensklassen wordt slechts een deelstroom afgekoeld zodat de mengtemperatuur van ongebruikt geothermisch water en de retourtemperatuur van het water uit de kas een behoorlijk hoge temperatuur oplevert. In de hogere vermogensklassen wordt weliswaar al het water gebruikt, maar wordt het uitgeoeld naar een vrij hoge retourtemperatuur. Onderstaande tabel toont de temperatuur van de restwarmte die uit de geothermiebron overblijft na uitkoeling door de bovenbeschreven kas, opgedeeld over de verschillende vermogenscategorieën



Figuur 4.6. Uitstromende watertemperatuur uit een energiezuinige kas die met geothermische warmte van 65 °C met een aanvoerwaterdebiet van 15 m³/(ha uur) wordt verwarmd, opgedeeld naar vermogensklasse.

Figuur 4.6. laat een aanvankelijke daling van de temperatuur zien omdat er een steeds grotere fractie van het maximale debiet vanuit de geothermische bron via het verwarmingssysteem wordt uitgeoeld. Boven de 65 W/m^2 loopt de temperatuur van het water waarnaar toe de geothermische warmte wordt uitgeoeld weer op vanwege de hoger wordende retourtemperatuur uit het verwarmingssysteem.

Gegeven de uitstroom-condities zoals getoond in Figuur 4.6. is het heel goed denkbaar dat er 'achter' de eerste kas nog een tweede kas aan de geothermische bron wordt geplaatst. Als deze kas even groot is en hetzelfde qua klimaatregeling en installatie kan de geothermiebron alleen in de lage vermogensklasse iets bijdragen. Dit blijkt uit Figuur 4.7, die vergelijkbaar is met Figuur 4.5.



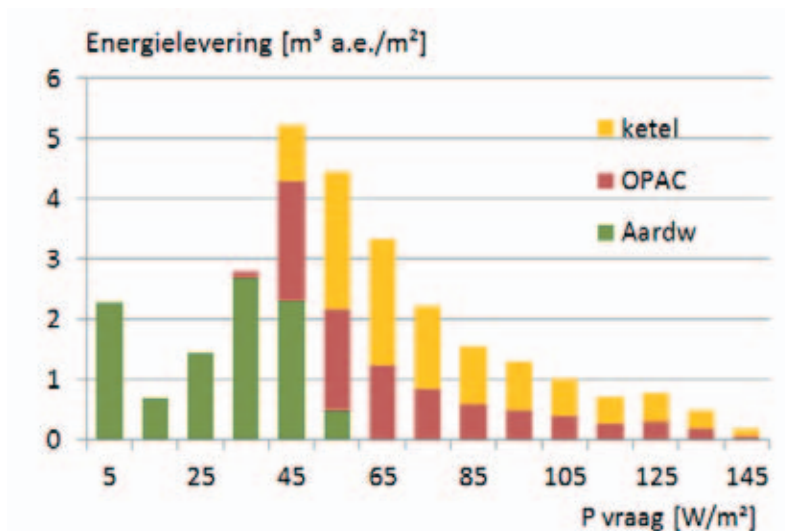
Figuur 4.7. Energielevering vanuit een aardwarmtebron en vanuit de ketel voor een tweede kas die nageschakeld is aan een kas die gebruik maakt van een geothermische bron van 65°C met een aanvoerwaterdebiet van $15 \text{ m}^3/(\text{ha uur})$. De tweede kas is net zo groot en is voorzien van hetzelfde verwarmingssysteem als de eerste kas.

Op de totale warmtevraag van deze tweede kas, die dus ook $29 \text{ m}^3 \text{ a.e.}$ per m^2 per jaar bedraagt, is de bijdrage uit de restwarmte van de eerste kas (en dus het restproduct van geothermische warmte) 10 m^3 aardgas equivalenten per m^2 per jaar. Deze tweede kas wordt dus voor 34% uit afvalwarmte verwarmd.

Bij vergelijking tussen Figuur 4.5. en 4.7 blijkt dat er in de vermogensklassen boven de 65 W/m^2 helemaal geen warmte vanuit de geothermiebron wordt geleverd terwijl het aangeboden water in deze vermogensklassen warmer is dan het water wat bijvoorbeeld bij 45 W/m^2 wordt aangeboden. Dit komt doordat bij deze hoge vermogensklassen het retourwater uit het verwarmingssysteem een gelijke temperatuur heeft ten opzichte van het aangeboden water en er dus geen vermogen aan kan worden onttrokken.

Deze situatie verandert drastisch als de 'nageschakelde kas' voorzien wordt van een echt laagtemperatuur verwarmingssysteem, zoals de OPAC106. Zoals gebleken in de experimenten bij PortaNova kan de OPAC prima uit de voeten met laagwaardige warmte.

Onderstaande grafiek toont de bijdrage die de warmtewisselaars kunnen leveren indien één OPAC per 80 m^2 kasoppervlak wordt geplaatst.



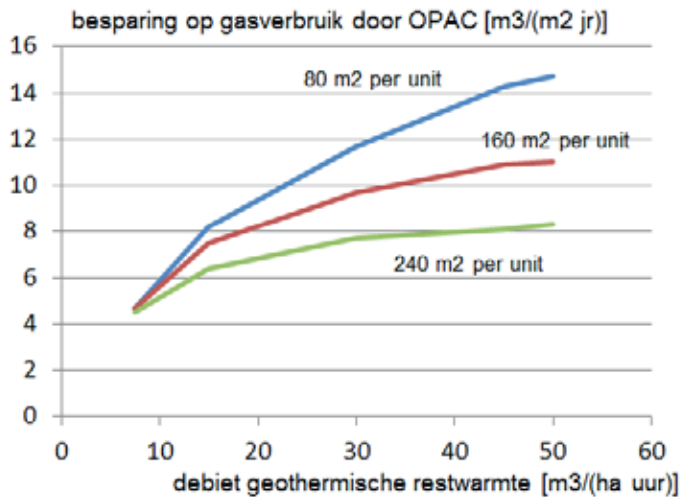
Figuur 4.8. Energielevering vanuit een aardwarmtebron direct of via de OPAC106 warmtewisselaar en vanuit de ketel voor een tweede kas die nageschakeld is aan een kas die gebruik maakt van een geothermische bron van 65 °C met een aanvoerwaterdebiet van 15 m³/(ha uur). De tweede kas is net zo groot als de eerste kas, maar heeft 125 OPACs per ha als extra verwarmingssysteem (één unit per 80 m²).

De inbreng van de warmte vanuit de OPAC warmtewisselaars maakt dat de ketel minder hoeft bij te stoken. De berekeningen geven aan dat in het bovenbeschreven geval de OPAC warmtewisselaar het gasverbruik voor de ketel met 8.2 m³ per m² per jaar verlaagt.

Het effect van de extra uitkoel-mogelijkheid die de OPAC warmtewisselaar oplevert hangt af van de dichtheid van de warmtewisselaars in de kas (minder OPAC's leveren een kleiner effect), maar ook van het debiet waarmee de eerste kas de restwarmte uit de geothermie-bron kan aanleveren. Als de oppervlakteverhouding tussen de eerste en de tweede kas niet 1 op 1 bedraagt, zoals in bovenbeschreven geval, maar bijvoorbeeld 2 op 1, dan betekent een aanvoerwaterdebiet van 15 m³/(ha uur) op het eerste bedrijf een aanvoerdebiet van geothermische restwarmte van 30 m³/(ha uur). Dit is overigens nog steeds voor OPAC-begrippen een erg laag debiet. Bij Porta Nova ligt het aanvoerdebiet op 75 tot 200 m³/(ha uur).

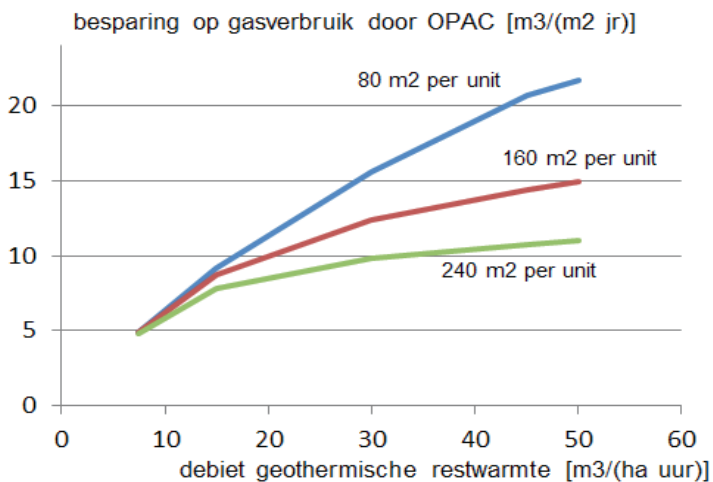
De grafiek in Figuur 4.9. toont de gasbesparing door de OPAC warmtewisselaar in afhankelijkheid van het restwarmtedebiet van het aantal m² kasoppervlak per unit.

Als er weinig water beschikbaar is, is de besparing door de toevoeging van OPACs aan het verwarmingssysteem beperkt. Het water kan immers niet verder uitgekoeld worden dan tot vlak bij de kasluchttemperatuur. Bij een groot waterdebiet, wat wil zeggen dat er 'achter' een kas van bijvoorbeeld 10 ha op een geothermiebron die 150 m³/uur kan leveren, een kas van 3 hectare met OPACs wordt voorzien kan de energiebesparing door de OPACs behoorlijk oplopen. Er moeten dan wel veel OPACs per ha worden geplaatst omdat het verwarmingsvermogen per OPAC behalve door het waterdebiet ook door het luchtdebiet wordt begrensd. Veel OPACs per ha betekent ook een grote luchtverplaatsing en dus een groot verwarmingspotentieel en daarmee een grote besparingsmogelijkheid op het gasverbruik van de ketel. Het elektriciteitsverbruik van de OPACs hangt vooral af van het aantal OPAC's dat gebruikt wordt. Als er één unit per 80 m² gebruikt wordt bedraagt het elektriciteitsverbruik ongeveer 7 kWh per m² per jaar. Als er één unit per 160 m² wordt gebruikt is het stroomverbruik 4 kWh per m² per jaar en bij gebruik van 1 unit per 240 m² is het stroomverbruik 2.6 kWh per m² per jaar.



Figuur 4.9. Energiebesparing door de toepassing van OPAC warmtewisselaars voor de verdere uitkoeling van geothermisch warm water dat eerst door een andere kas in een buisverwarmingssysteem is gebruikt. Deze eerste kas had de beschikking over 15 m^3 geothermische warmte per ha per uur op een temperatuurniveau van 65°C .

Behalve bij vergroting van het restwarmtedebiet en het aantal OPACs per ha, wordt het effect van de OPAC ook beïnvloed door het maximale debiet waarmee de eerste kas, dus de kas zonder OPACs, aanspraak kan maken op de geothermische energie. Figuur 4.10. is analoog aan Figuur 4.9, maar betreft het effect van de OPAC in de nageschakelde kas indien de eerste kas slechts 10 m^3 geothermisch water per ha per uur kan gebruiken (in plaats van $15 \text{ m}^3/(\text{ha uur})$ zoals in de voorgaande gevallen).



Figuur 4.10. Energiebesparing door de toepassing van OPAC warmtewisselaars voor de verdere uitkoeling van geothermisch warm water die eerst door een andere kas in een buisverwarmingssysteem is gebruikt. Deze eerste kas had de beschikking over 10 m^3 geothermische warmte per ha per uur op een temperatuurniveau van 65°C .

De krappe beschikbaarheid van geothermische warmte voor de eerste kas betekent dat de restwarmte die overblijft voor de nageschakelde kas gemiddeld kouder is. Hierdoor wordt de OPAC al in de vermogensrange van 30 tot 40 W/m² aangesproken (in de voorgaande berekeningen was dit één staffel verder) zodat de warmtewisselaars 800 uur extra zullen draaien. Daarnaast is ook het aandeel van OPACs in de invulling van de energievraag in de staffels van 40 tot 50 en van 50 tot 60 W/m² groter zodat de totale bijdrage van de OPACs groot wordt.

Het effect van buffering

In alle berekeningen is niet ingegaan op het effect van buffering. Bij gebruik van buffers zal de dekkinggraad van de geothermische warmte in de totale warmtevoorziening nog wat hoger worden. Dit zal echter zowel voor het geval mét als zonder OPACs het geval zijn, waardoor verwacht is dat het effect van plaatsing van de OPACs niet veel zal veranderen.

4.2 Economische prestatie

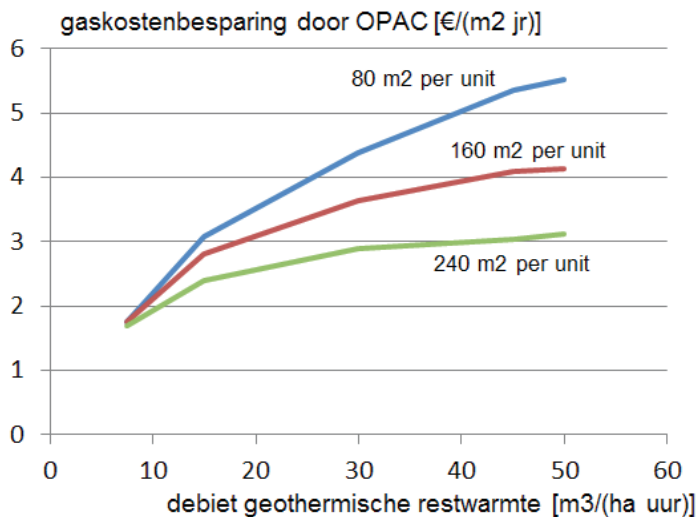
Het gebruik van OPAC warmtewisselaars brengt vooral investeringskosten met zich mee. Daarnaast gebruiken de warmtewisselaars elektriciteit.

De investeringskosten voor de wisselaars, inclusief elektrische en waterzijdige aansluiting bedraagt € 2500 per OPAC. Met een afschrijvingsperiode van 10 jaar, een rentepercentage van 4% en enige onderhoudskosten zijn de jaarkosten voor de investering per OPAC € 325.

Bij installatie van 1 OPAC per 80, 160 of 240 m² zijn de jaarkosten voor de investering dus respectievelijk € 4.06, € 2.03 en € 1.35 per m² kas per jaar. Bovenop deze kosten komen de elektriciteitskosten voor de aandrijving van de ventilatoren van de OPACs (resp. 7, 4 en 2.6 kWh/(m² jr), zie pag. 18). Bij een stroomprijs van 10 ct per kWh worden de jaarkosten dan respectievelijk € 4.76, € 2.43 en € 1.61.

De kosten voor de toevoeging van OPAC warmtewisselaars moeten worden goedge maakt door een verlaging van de kosten voor gasinkoop. Deze verlaging komt uit besparing op de commodity, maar ook uit besparingen op de aansluitcapaciteit. Met name op bedrijven waar de basis-warmtelast vanuit geothermie wordt verzorgd zijn de capaciteitskosten relatief groot. De toevoeging van OPAC warmtewisselaars geven over het hele vermogenstraject een verlaging van het vermogen dat de ketel hoeft te regelen en geeft dus een duidelijke verlaging van de capaciteitsbehoefte. Het gaat in de analyse voor dit project te ver om het effect van een vermindering van de aansluitcapaciteit precies door te rekenen, dus daarom wordt gesteld dat de waarde van de vermindering van het gasverbruik 1.25 maal zo groot is als de commodity-prijs van aardgas. Bij een gasprijs van 30 cent per m³ is de waarde van de toevoeging van OPAC warmtewisselaars dus 37.5 cent per m³.

Met deze waarde van de besparing op gasverbruik kunnen de grafiek van Figuur 4.9. en Figuur 4.10. worden vertaald naar een economische waarde.



Figuur 4.11. Gaskostenbesparing door besparing op commodity en capaciteitskosten voor gas bij gebruik van OPAC warmtewisselaars voor de verdere uitkoeling van geothermische warmte die eerst door een andere kas in een buisverwarmingssysteem is gebruikt. Deze eerste kas had de beschikking over 15 m³/(ha uur) geothermische warmte op een temperatuurniveau van 65 °C. De grafiek geldt voor een commodity gasprijs van 30 cent per m³ en een totaalprijs van 37.5 cent per m³ indien de capaciteitskosten over het (lage) gasverbruik worden uitgesmeerd.

Met de genoemde jaarkosten van de OPAC warmtewisselaar van kostprijs van € 4.76, € 2.43 en € 1.61 bij gebruik van één OPAC op respectievelijk 80, 160 of 240 m² kasoppervlak blijkt dat het gebruik van een lage OPAC-dichtheid in alle gevallen economisch aantrekkelijk is (gegeven de aangenomen commodity gasprijs van 30 cent per m³). Het gebruik van de OPAC met een dichtheid van één unit per 80 m², dus gelijk aan de dichtheid bij Porta Nova blijkt onder de gestelde uitgangspunten alleen mogelijk wanneer de 'nageschakelde kas' een groot debiet aan geothermische restwarmte aangeboden krijgt.

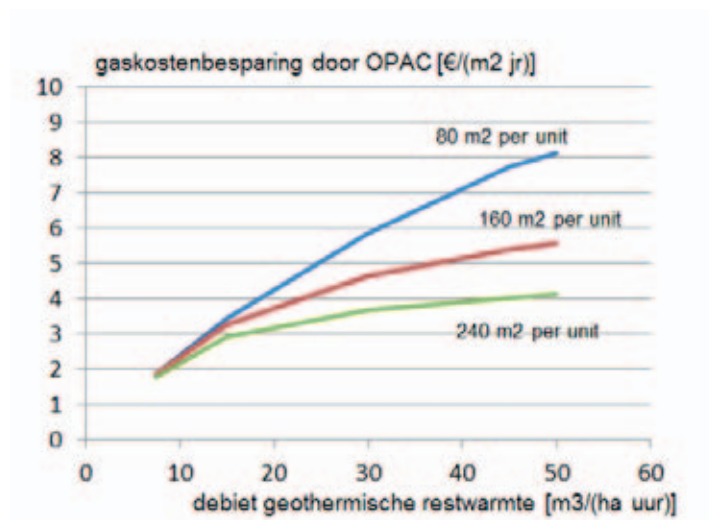
De achtergrond van het feit dat in de bovengeschetste situatie alleen de lage OPAC-dichtheden renderen ligt in de relatief hoge dekkingsgraad die nog gerealiseerd kan worden met de restwarmte uit de geothermie nadat de eerste kas deze benut heeft. Dit komt omdat de 'eerste' kas een relatief groot waterdebiet uit Geothermie tot zijn beschikking heeft en dus een relatief goede 'kwaliteit' geothermische afvalwarmte kan leveren. De kwaliteit (het temperatuurniveau) van deze restwarmte maakt dan dat de 'nageschakelde' kas ook zonder OPACs nog een behoorlijke benutting kan worden gerealiseerd.

Deze situatie verandert wanneer het oppervlak van de 'eerste' kas die op de geothermische bron is aangesloten groter wordt. Als de 'eerste' kas geen 15 m³/(ha uur) geothermisch water kan betrekken maar slechts 10 m³/(ha uur) dan wordt temperatuur van de geothermische restwarmte lager en neemt het effect van de OPAC warmtewisselaar toe. Dit bleek al uit Figuur 4.10. waar de besparingen door de OPACs veel groter waren dan in de situatie bij Figuur 4.9. Uit Figuur 4.12. kan worden afgelezen dat de besparing op gaskosten door de OPAC warmtewisselaars oploopt tot meer dan 8 euro per m² per jaar indien er een hoge OPAC-dichtheid wordt geplaatst ter benutting van de geothermische restwarmte met een maximaal debiet van 50 m³/(ha uur) uit een kas die 10 m³/(ha uur) geothermische warmte kan betrekken. Praktisch gesproken betekent dit dat er bijvoorbeeld 15 ha kas op een geothermische bron die 150 m³/uur levert is aangesloten en dat het water na gebruik in deze eerste 15 ha nog door 3 ha kasoppervlak wordt geleid die voorzien is van OPAC warmtewisselaars.

Als op deze 3 ha 375 OPACs worden geplaatst (dus 80 m² per OPAC), dan zal deze 3 ha hierdoor 22 m³ aardgas besparen (zie Figuur 4.10.). Bij een commodityprijs van 30 cent per m³ en vanwege het feit dat er in dat geval ook fors de aansluitcapaciteit fors kan worden verkleind zorgt de OPAC in dat geval voor ruim 8 euro per m² per jaar aan besparing op gaskosten.

Deze 8 euro per jaar is fors hoger dan de kosten die voor deze 125 OPACs per ha in rekening moeten worden gebracht (4.76 €/m²) zodat deze investering in iets meer dan 2 jaar is terugverdiend.

Bij een lagere OPAC-dichtheden is het effect kleiner, maar zijn ook de kosten aanzienlijk kleiner en blijft de te behalen marge ongeveer gelijk.



Figuur 4.12. Gaskostenbesparing door besparing op commodity en capaciteitskosten voor gas bij gebruik van OPAC warmtewisselaars voor de verdere uitkoeling van geothermische warmte die eerst door een andere kas in een buisverwarmingssysteem is gebruikt. Deze eerste kas had de beschikking over 10 m³/(ha uur) geothermische warmte op een temperatuurniveau van 65 °C. De grafiek geldt voor een commodity gasprijs van 30 cent per m³ en een totaalprijs van 37.5 cent per m³ indien de capaciteitskosten over het (lage) gasverbruik worden uitgesmeerd.

Het gunstige perspectief voor de toepassing van de OPAC neemt snel af wanneer het debiet waarmee de geothermische restwarmte wordt aangeboden afneemt. In de hierboven beschreven praktische situatie was er sprake van een gunstige situatie met 3 ha kas met OPAC's die de geothermische restwarmte van 15 ha kas zonder OPAC gebruikte. Als deze verhouding 1 op 2.5 zou zijn dan zakt het maximale restwarmtedebiet naar 25 m³/(ha uur) en kunnen alleen de lage OPAC-dichtheden nog economisch voordeel bieden.

Overigens is het juist bij die lage OPAC-dichtheden niet zeker dat de horizontale temperatuurverdeling die met deze warmtewisselaars kan worden gerealiseerd onverminderd goed blijft. De resultaten met een dichtheid van één OPAC per 80 m² waren goed, maar er is nog geen ervaring met de temperatuurverdeling bij een beduidend lagere dichtheid.

4.3 Conclusie

De OPAC106 warmtewisselaar kan een rol spelen bij de verdere uitnutting van geothermische warmte. Dit zou dan kunnen plaatsvinden door 'achter' een kas die reeds gebruik maakt van geothermie nog een bepaald oppervlak bij te bouwen die dan de 'geothermische restwarmte' benut. De OPAC heeft vooral perspectief wanneer de 'eerste' kas, en dat is de kas die direct op de geothermie-bron is aangesloten, een relatief kleine aansluitcapaciteit heeft. Hierbij moet gedacht worden aan een aansluitcapaciteit van $10 \text{ m}^3/(\text{ha uur})$. De geothermische restwarmte uit een kas die met zo'n debiet wordt belevend is van lage kwaliteit (veelal niet warmer dan $35 \text{ }^\circ\text{C}$), waardoor de verdere uitnutting door de OPAC tot een substantiële verhoging van de dekkingsgraad leidt.

Als de aansluitcapaciteit van de 'eerste' kas groter is, bijvoorbeeld $15 \text{ m}^3/(\text{ha uur})$, dan heeft de geothermische restwarmte die overblijft na gebruik door deze eerste kas nog een behoorlijke kwaliteit, waardoor het effect van de toevoeging van de OPAC warmtewisselaar aan een kas die 'achter' deze eerste kas wordt geplaatst kleiner zal zijn. De toevoeging van OPACs levert dan minder op. Dit betekent dat in dat geval hooguit OPACs in een lage dichtheid kunnen worden toegepast (bijvoorbeeld één OPAC per 160 m^2). Het gasbesparingseffect van een lage OPAC-dichtheid is minder groot, maar de investeringskosten blijven ook beperkt, wat de toepassing van OPACs ook vanuit economisch oogpunt verantwoord maakt.

Het precieze perspectief hangt sterk samen met het maximale debiet waarmee de geothermische restwarmte kan worden betrokken. Als richtlijn kan genomen worden dat het geothermische restwarmte-debiet tussen de 20 en 40 m^3 per ha per uur moet liggen. Dit is een slag groter dan het debiet dat bij gebruik van geothermie in gebruikelijke systemen gebruikt wordt dus de 'nageschakelde' kassen die gebruik zouden kunnen maken van de OPAC warmtewisselaar beslaan een oppervlak die een slag kleiner zijn dan 'gewone' kassen met geothermie. Als er bijvoorbeeld 15 ha gewone kas op een geothermie-bron met een capaciteit van $150 \text{ m}^3/\text{uur}$ wordt aangesloten dan zou hier nog zo'n 3 tot 5 ha kassen aan toegevoegd kunnen worden die met gebruik van OPACs de geothermische restwarmte uit die eerste 15 ha nog verder uitnuttten.

De vraag met betrekking tot deze wijze van gebruik van de OPAC warmtewisselaar is echter nog wel wat de minimale OPAC-dichtheid is waarbij nog een goede horizontale temperatuurverdeling gegarandeerd blijft. Bij een dichtheid van één unit per 80 m^2 is in voorliggend onderzoekproject gebleken dat de temperatuurverdeling goed is, maar als het te bedienen oppervlak per OPAC toeneemt zal de horizontale temperatuur-homogeniteit onder druk komen te staan. Het is nog onbekend waar de grens voor de minimale OPAC-dichtheid ligt.

5 Overall conclusie

Uit eerder onderzoek naar de OPAC106 warmtewisselaar is gebleken dat deze warmtewisselaar als zeer efficiënt geclassificeerd kan worden, vooral wanneer de compacte inbouwmaten in beschouwing worden genomen. De hoge efficiëntie wordt bereikt door de toepassing van een aerodynamisch geoptimaliseerd warmtewisselaar-blok met ovale pijpen die een verminderde luchtweerstand opleveren. Ook het gekozen ventilatortype draagt bij aan een laag elektriciteitsverbruik per eenheid warmteuitwisseling. Dit geldt met name wanneer de ventilator op deellast draait.

De compacte inbouwmaat wordt onder andere mogelijk gemaakt door de keus voor dunne lamellen in het warmtewisselaar blok. De dunne lamellen vormen een kwetsbaar onderdeel van de warmtewisselaar. Bij een inventarisatie onder tuinders die al een aantal jaren intensief met kaskoeling aan het werk zijn, bleek dat de lamellen van de warmtewisselaars die uit dun aluminium zijn samengesteld na een jaar of vier duidelijk brosser en daardoor kwetsbaarder zijn geworden. Voor de lamellen van de warmtewisselaars bij deze tuinders lijkt een technische levensduur van acht jaar reëel. De lamellen van de OPAC106 zijn gecoat, waardoor ze beter bestand zullen zijn tegen corrosie. Daarom is gesteld dat het voor de OPAC106 reëel is te stellen dat de technische levensduur tien jaar bedraagt. In de loop van de tijd zal het schoonmaken van de warmtewisselaar, wat één tot twee keer per jaar zal moeten plaatsvinden, wel steeds voorzichtiger moeten gebeuren omdat de lamellen toch in de loop van de tijd hun elasticiteit zullen verliezen.

De temperatuurverdeling in een kas met een rozengekas die met de OPAC106 wordt verwarmd en gekoeld is goed. Dit blijkt uit de metingen op de eerste kas die met de OPAC106 is uitgevoerd, een 6.4 ha grote rozenkas in Waddinxveen (Porta Nova). In deze kas waren de OPACs met een dichtheid van één unit per 80 m² opgehangen.

Op momentane basis ligt de spreiding in de horizontale temperatuurverdeling op gewashoogte (vlak boven de bloemknoppen) in een band van 3 °C. Op etmaalbasis zijn de verschillen tussen de warmste en de koudste plaats ongeveer 2 °C en op weekbasis nog iets minder.

Op een nog wat langere tijdbasis (een paar weken) is het verschil tussen de warmste en koudste plek in een meetveld dat omringd is door warmtewisselaars ongeveer 1 °C.

De optredende spreiding is klein genoeg om door de tuinder als homogeen te kunnen worden beschouwd. Dit betekent dat de tuinder met de keus voor het in te stellen temperatuurregime geen rekening hoeft te houden met eventuele warmere of koudere plekken waar eventueel problemen kunnen ontstaan. De tuinder waar de metingen hebben plaatsgevonden is dan ook zeer tevreden met de gerealiseerde temperatuurverdeling.

Behalve voor gebruik in semigesloten kassen, waar de warmtewisselaars in de zomer warmte verzamelen ten behoeve van de verwarming van de kas in de winter, kan de OPAC106 ook goed gebruikt worden voor de vergroting van de benuttingsgraad van warmte uit geothermie. Wanneer een kassencomplex met een gewoon buisverwarmingssysteem op een geothermische warmtebron wordt aangesloten dan geeft zo'n complex een geothermische restwarmtestroom met water wat vaak warmer is dan 35 of 40 °C. De OPAC106 kan deze geothermische restwarmte verder uitnuttigen door het af te koelen naar zo'n 25 °C.

Om de OPAC106 economisch verantwoord hiervoor in te zetten moet er echter sprake zijn van een relatief klein oppervlak aan 'nageschakelde kassen' in vergelijking met het oppervlak van het kassencomplex dat alleen via een buisverwarmingssysteem gebruik maakt van de geothermische warmte (ongeveer een verhouding 1 op 3 tot 1 op 5). Voor een goed economisch perspectief is het ook belangrijk dat de OPACs in een lagere dichtheid worden toegepast dan in de rozenkas waarop de ervaringen tot nu toe zijn gebaseerd. In plaats van één OPAC per 80 m² kas zouden voor de verder uitnutting van geothermische warmte in veel gevallen liever OPACs met een dichtheid van één per 160 m² worden gebruikt of zelfs een nog lagere dichtheid. Een lagere dichtheid geeft een wat lagere besparing op de gaskosten, maar vooral fors lagere investeringslasten, waardoor het economisch perspectief gunstiger wordt. De vraag is echter of een lagere OPAC-dichtheid nog steeds tot een voldoende goede horizontale temperatuurverdeling leidt. Het antwoord op deze vraag kan worden verkregen door in een voorkomend geval een experiment uit te voeren in een kas met een half zo grote OPAC-dichtheid en dan te evalueren of de horizontale temperatuurverdeling tijdens het verwarmen van de kas nog steeds voldoende goed is.

